

Name:.....Vorname:.....Mtrl. Nr:.....

1. Das Bohrsche Atommodell verwendet vereinfachte Modellvorstellungen (gemeint sind physikalische Ansätze) hinsichtlich des Atomaufbaus.
  - a. Beschreiben Sie das Bohrsche Atommodell.
  - b. Welche Kraft wirkt zwischen Atomkern und Hüllenelektron?
  - c. Welche Bedingungen gelten für den Bahndrehimpuls des Elektrons?
  - d. Wie bezeichnet man die verschiedenen Elektronenschalen und die Unterschalen?
  - e. Wie viele Elektronen können die verschiedenen Elektronenschalen aufnehmen?
  
2. Industrielle Staubfilter basieren nach ähnlichen Prinzipien, wie das historische Millikan-Experiment zur Bestimmung der elektrischen Elementarladung. Betrachten Sie Öltröpfchen mit Radien von ca.  $1\ \mu\text{m}$ , die mit einer einzigen elektrischen Elementarladung versehen sind und durch ein elektrisches Feld gegen die Gewichtskraft angehoben werden sollen.
  - a. Das Tröpfchen soll aus Ölsäure der Dichte  $0,9\ \text{g cm}^{-3}$  und der Molmasse von  $282\ \text{g mol}^{-1}$  bestehen. Wie viele Ölsäuremoleküle enthält ein Tröpfchen mit Radius von  $1\ \mu\text{m}$ ?
  - b. Welche elektrische Spannung muss an einen Plattenkondensator gelegt werden, damit ein  $1\ \mu\text{m}$  großes Öltröpfchen mit Radius von  $1\ \mu\text{m}$  versehen mit einer elektrischen Elementarladung im homogenen elektrischen Feld des Kondensators mit Plattenabstand  $1\ \text{mm}$  zum Schweben gebracht werden kann?

Masse: 
$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi R^3$$
$$m = 0,9\ \text{g cm}^{-3} \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot (1 \cdot 10^{-4})^3\ \text{cm}^3$$
$$m = 3,7699 \cdot 10^{-12}\ \text{g}$$

Zahl der Ölsäuremoleküle: 
$$N = N_A \cdot \frac{m}{M}$$
$$N = 6,022 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1} \cdot \frac{3,7699 \cdot 10^{-12}\ \text{g}}{282\ \text{g mol}^{-1}}$$
$$N = 8,050 \cdot 10^9$$

Coulombkraft = Auftriebskraft: 
$$q \cdot E = m \cdot g$$

Homogener Plattenkondensator: 
$$E = U / d$$

Lösung: 
$$U = \frac{m \cdot g \cdot d}{e}$$

$$U = \frac{3,76 \cdot 10^{-15}\ \text{kg} \cdot 9,81\ \text{ms}^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3}\ \text{m}}{1,60210^{-19}\ \text{As}} = 230\ \text{V}$$

3. Schätzen Sie den Atomradius eines Mangan-Atoms aus der Dichte  $\rho_{\text{Mn}} = 7,44\ \text{g cm}^{-3}$ , der Molmasse  $A_{\text{rel}} = 54,94\ \text{g mol}^{-1}$  und der Avogadro-Konstante  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}$ .

$$V_{\text{Atom}} = \frac{m_{\text{Atom}}}{\rho} = \frac{A_r}{N_A \cdot \rho}$$



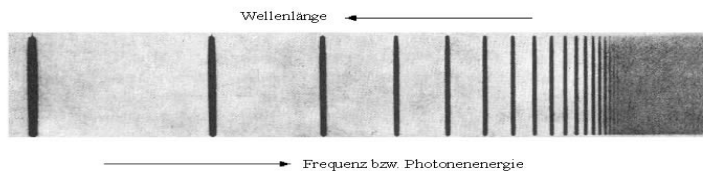
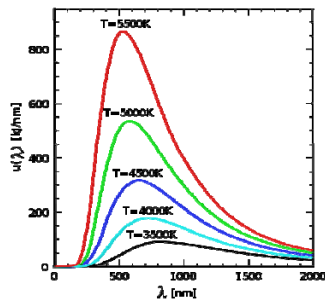
$$V_{Atom} = \frac{4}{3} \pi R_{Atom}^3$$

$$R_{Atom} = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \frac{A_r}{N_A \cdot \rho}}$$

$$R_{Atom} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 54,94 \text{ g mol}^{-1}}{4\pi \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot 7,44 \text{ g cm}^{-3}}}$$

$$R_{Atom} = 1,43 \cdot 10^{-8} \text{ cm} = 0,143 \text{ nm}$$

- 4a. Skizzieren Sie die spektrale Intensität  $dI/d\lambda$  eines „schwarzen Körpers“ als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  für verschiedene Temperaturen.
- b. Wodurch unterscheiden sich die Strahlungsspektren von „schwarzer Körper“ von den Spektren der Gasentladungsröhren?



- b. Spektren "schwarzer Körper" sind kontinuierlich, Spektren von Gasentladungsröhren sind diskret.
5. Ordnen Sie die folgenden elektromagnetischen Strahlungsarten nach aufsteigender Energie (es reicht, die Kurzbezeichnung zu verwenden).  
*IR-Strahlung (IR), UV-Strahlung (UV), Radarstrahlung (RA), sichtbares Licht (SL),  $\gamma$ -Strahlung aus radioaktivem Zerfall (GA), Radiostrahlung (UKW), Röntgenstrahlung(XR).*

$$UKW < RA < IR < SL < UV < XR < GA .$$

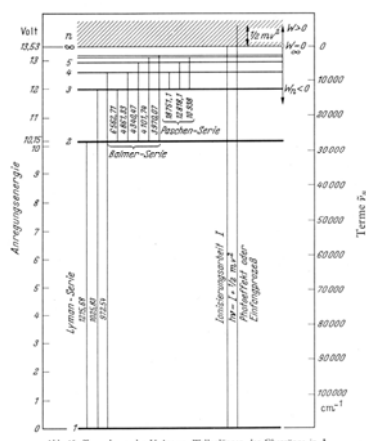
6. Sichtbares Licht besitzt Wellenlängen im Bereich von 380 nm bis 780 nm. Welchen Energiewerten in der Einheit 1 eV entsprechen diese beiden Werte?

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 2,997 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{380 \text{ nm}} = 3,26 \text{ eV}$$

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 2,997 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{780 \text{ nm}} = 1,59 \text{ eV}$$

7. Skizzieren Sie das Energieniveauschema des Elektrons in einem neutralen Wasserstoffatom?



8. Erklären Sie die Begriffe: Isotope, Isobare, Isotone.
9. Welche Umwandlungsreaktionen beschreiben den  $\alpha$ -,  $\beta^-$ -,  $\beta^+$ - und den EC-Zerfall (EC = electron capture). Wie groß muss für die Zerfallsenergie sein, damit zusätzlich zum EC auch  $\beta^+$ -Zerfall möglich ist?

$$\begin{aligned} \alpha\text{-Zerfall:} & \quad {}^A_Z E1_N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} E2_{N-2} + {}^4_2 \text{He}_2 + Q_\alpha \\ \beta^-\text{-Zerfall:} & \quad {}^A_Z E1_N \rightarrow {}^A_{Z+1} E3_{N-1} + e^- + \bar{\nu} + Q_{\beta^-} \\ \beta^+\text{-Zerfall:} & \quad {}^A_Z E1_N \rightarrow {}^A_{Z-1} E4_{N+1} + e^+ + \nu + Q_{\beta^+} \\ \text{EC-Zerfall:} & \quad {}^A_Z E1_N + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} E4_{N+1} + \nu + Q_{EC} \\ \text{Es muss gelten:} & \quad Q_{EC} = Q_{\beta^+} + 1022 \text{ keV} \end{aligned}$$

- 10a. Was versteht man unter der "Spontanspaltung" des  ${}^{238}\text{U}$ ?
- b. Beschreiben Sie den Vorgang einer "neutroneninduzierten Spaltung" des  ${}^{235}\text{U}$ .
- c. Welche Stoffe werden als "Spaltstoffe" bezeichnet?
- d. Was versteht man unter einer "Spaltbarriere"?
- 11a. Berechnen Sie mit Hilfe des Massenexzess-Tabelle (mass excess)  $m_{\text{exc}}(Z,A) \cdot c^2$  die Bindungsenergie pro Nukleon von  ${}^3\text{He}$  und  ${}^4\text{He}$ .
- b. Wie kann man die unterschiedlichen Zahlenwerte der Bindungsenergien der beide He Isotope interpretieren?

a. Bindungsenergie:  $B(Z, A) = (Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n - m(Z, A)) \cdot c^2$

Bindungsenergie von  ${}^3\text{He}$ :  $B(2, 3) = (2 \cdot m_H + (3 - 2) \cdot m_n - m(2, 3)) \cdot c^2$

$$B(2, 3) = (2 \cdot 7288,9705 + (3 - 2) \cdot 8071,3171 - 14931,21475) \cdot \text{keV}$$

$$B(2, 3) = 7718,04335 \text{ keV}$$

$$\frac{B}{A}(2, 3) = \frac{B(2, 3)}{3} = 2572,68112 \text{ keV}$$

Bindungsenergie von  ${}^4\text{He}$ :  $B(2, 4) = (2 \cdot m_H + (4 - 2) \cdot m_n - m(2, 4)) \cdot c^2$

$$B(2, 4) = (2 \cdot 7288,9705 + (4 - 2) \cdot 8071,3171 - 2424,91565) \cdot \text{keV}$$

$$B(2, 4) = 28295,6596 \text{ keV}$$

$$\frac{B}{A}(2, 4) = \frac{B(2, 4)}{4} = 7073,91489 \text{ keV}$$

- b. Die Bindungsenergie von  ${}^3\text{He}$  ist mit 2573 keV pro Nukleon deutlich kleiner als der Wert für  ${}^4\text{He}$  mit 7074 keV.  
Die Nukleonen des  ${}^4\text{He}$  sind also sehr viel fester gebunden als die von  ${}^3\text{He}$ .

12. Berechnen Sie die exakte Masse  $m(Z, A)$  eines neutralen  ${}^3\text{He}$ -Atoms. Geben Sie das Ergebnis sowohl in der Einheit MeV als auch in der Einheit kg an.

Bestimmung der Masse:  $m(Z, A) \cdot c^2 = m_{\text{exc}}(Z, A) \cdot c^2 + A \cdot (u \cdot c^2)$

$$m(Z = 2, A = 3) \cdot c^2 = 14,949806 \text{ keV} + 3 \cdot 931,494043 \text{ MeV}$$

$$m(2, 3) \cdot c^2 = 2809,41334 \text{ MeV}$$



Umrechnung:  $1 u = 1,66053886 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$   
 entspricht:  $1 u \cdot c^2 = 931,494043 \text{ MeV}$   
 $m(2,3) \cdot c^2 = 5,00823 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

13. Das radioaktive Isotop  $^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2} = 5730 \text{ a}$ ) in der Atmosphäre entsteht kontinuierlich durch Kernreaktionen von Neutronen, die durch die kosmische Strahlung in sehr hohen Schichten der Atmosphäre gebildet werden, mit dem Luftstickstoff ( $^{14}\text{N}$ ).
- a. Wie lautet die Reaktionsgleichung? Berechnen Sie die bei der Reaktion frei werdende, bzw. benötigte Reaktionsenergie.
- b. Im Kohlenstoff von Pflanzen und Tiere (auch Menschen) findet man pro  $10^{12}$  Atome des Elements Kohlenstoff durchschnittlich 1,5 Atome des  $^{14}\text{C}$ . im Mittel 1,5  $^{14}\text{C}$  Atome. Der menschliche Körper enthält Kohlenstoff mit 28 Gew.-%. Welche  $^{14}\text{C}$  Aktivität befindet sich in einer Person der Masse 70 kg?  
*Hinweis: Man kann bei der Berechnung den (Unterschied von  $^{12}\text{C}$  (98,93%) und  $^{13}\text{C}$  (1,07%) vernachlässigen und  $^{12}\text{C}$  (~100%) verwenden.*  
 (Relative Atommasse des Elements Kohlenstoff:  $12,0107 \text{ g mol}^{-1}$ )

a. Kernreaktion:  $^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{H}$  plus  $Q_1$   
 Reaktionsenergie:  $Q_1 = (m_{\text{exc}}(7,14) + m_{\text{exc}}(0,1) - m_{\text{exc}}(6,14) - m_{\text{exc}}(1,1)) \cdot c^2$   
 $Q_1 = (2863,41704 + 8071,3171 - 3019,89305 - 7288,9705) \cdot \text{keV}$   
 $Q_1 = +625,87059 \text{ keV}$

Die Reaktion ist exotherm. Es werden 626 keV pro Reaktion frei.

b. Masse des Kohlenstoffs pro Person:  $m_C = 0,28 \cdot 70 \text{ kg} = 20 \text{ kg} = 20000 \text{ g}$

Zahl der Kohlenstoffatome pro Person:  $N_C = \frac{m_C}{A_{\text{rel,C}}} \cdot N_A$

$$N_C = \frac{20000 \text{ g}}{12,0107 \text{ g mol}^{-1}} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 1,00277 \cdot 10^{27}$$

Zahl der  $^{14}\text{C}$ -Atome pro Person:  $N_{^{14}\text{C}} = N_C \cdot 1,5 \cdot 10^{-12}$

$$N_{^{14}\text{C}} = 1,00277 \cdot 10^{27} \cdot 1,5 \cdot 10^{-12} = 1,50416 \cdot 10^{15}$$

Aktivität:  $A_{^{14}\text{C}} = -\lambda_{^{14}\text{C}} \cdot N_{^{14}\text{C}}$

$$A_{^{14}\text{C}} = -\frac{\ln(2)}{T_{1/2}({}^{14}\text{C})} \cdot N_{^{14}\text{C}}$$

$$A_{^{14}\text{C}} = -\frac{\ln(2)}{5230 \cdot 365,25 \cdot 86400 \text{ s}} \cdot 1,50416 \cdot 10^{15} = 9113 \text{ s}^{-1}$$

Der Mensch enthält eine  $^{14}\text{C}$  Aktivität von circa 10 kBq.

14. In den Strukturmaterialien von kerntechnischen Anlagen kann als Folge einer Bestrahlung mit Neutronen das radioaktive Isotop  $^{65}\text{Zn}$  gebildet werden. Beschreiben Sie die Zerfalleigenschaften des  $^{65}\text{Zn}$  (siehe dazu die Anlage A1)

$^{65}\text{Zn}$  zerfällt durch  $\beta^+ + \text{EC}$  mit einer Halbwertszeit  $T_{1/2} = 144,26 \text{ d}$  zum stabilen  $^{65}\text{Cu}$ . Die gesamte Zerfallsenergie beträgt  $Q_{\text{EC}} = 1351,9 \text{ keV}$ . Da  $Q_{\text{EC}} > 1022 \text{ keV}$  ist, kann beim Zerfall des  $^{65}\text{Zn}$  zum  $^{65}\text{Cu}$ -Grundzustand eine Mischung von  $\beta^+$  und EC Zerfall auftreten. Die Intensität des Grundzustandszerfalls beträgt 49,40%. Beim Zerfall zum zweiten Anregungsniveau des  $^{65}\text{Cu}$  (Anregungsenergie von  $1115,556 \text{ keV}$ ), der mit einer Intensität von



50,60% auftritt, ist nur EC möglich. Zerfall zum ersten Anregungsniveau (Anregungsenergie von 770,64 keV) wurde nicht beobachtet. Die Anregungsenergie des zweiten Anregungszustands wird hauptsächlich durch eine  $\gamma$ -Strahlung der Energie 1115,546 keV angegeben. Die Intensität beträgt 50,60%. Der Übergang zum ersten Anregungszustand ( $\gamma$ -Energie 344,95 keV) tritt nur mit einer Intensität von 0,0030% auf. Der erste Anregungszustand sendet eine  $\gamma$ -Strahlung von 770,64 keV aus. Die Intensität beträgt ebenfalls 0,0030%.

15. Ein Messlabor beschafft eine Lösung mit radioaktivem  $^{65}\text{Zn}$ . Laut Angabe des Lieferanten betrug die Zahl der  $^{65}\text{Zn}$ -Zerfälle in 100 ml der Lösungsmenge am 01.04.2015  $A_0 = -250 \text{ MBq}$ .

Welche Aktivität des  $^{65}\text{Zn}$  Atome befindet sich heute am 12.05.2016 in der 100 ml Lösungsmenge?

Integrales Zerfallsgesetz:  $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot \Delta t} = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot \Delta t}{T_{1/2}}}$

Zeitdifferenz:  $\Delta t = 407 \text{ d}$

Halbwertszeit:  $T_{1/2} = 244,26 \text{ d}$

Aktivität am 12.05.2016:  $A(t = 12.05.2016) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot \Delta t} = -250 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot 407 \text{ d}}{244,26 \text{ d}}}$

$A(t = 12.05.2016) = -78,8 \text{ MBq}$

16. Radioaktives Material mit  $^{65}\text{Zn}$  soll zur Abschirmung in einem Bleibehälter gelagert werden. Welche Dicke muss die Bleiabschirmung mindestens haben, um für die  $\gamma$ -Strahlung des  $^{65}\text{Zn}$  mit höchster Energie eine Schwächung von  $10^{-4}$  zu erreichen? (Dichte des Bleis:  $\rho_{\text{pb}} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$ ).

Berechnung von  $\frac{\mu}{\rho}$  (Interpolation von Tabellenwerten aus den Daten im Anhang)

E / keV	$\mu/\rho$ / (cm**2/g)	ln(E)	ln( $\mu/\rho$ )
1000	7,102E-02	6,90776	-2,64479
1300	5,876E-02	7,17012	-2,83429
<b>1115,5</b>	<b>6,563E-02</b>	7,01706	-2,72374

Für die  $\gamma$ -Strahlungsenergie von  $E_\gamma = 1115,5 \text{ keV}$  ergibt sich:

Massenschwächungskoeffizient:  $\frac{\mu}{\rho} = 6,563 \cdot 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} = 0,06563 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$

Schwächungskoeffizient:  $\mu = \frac{\mu}{\rho} \cdot \rho = 0,06563 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \cdot 11,3 \text{ g cm}^{-3} = 0,7416 \text{ cm}^{-1}$

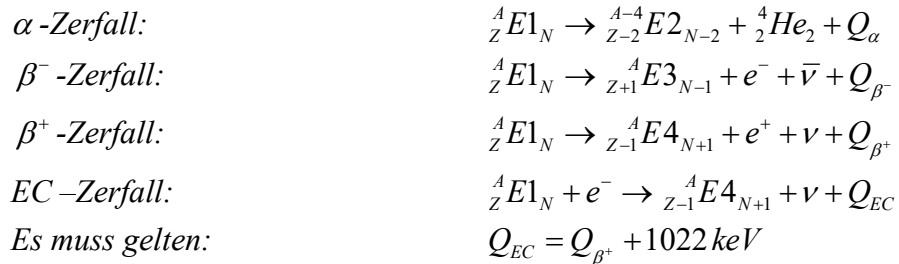
Dicke der Abschirmung:  $z_{\text{PB}} = -\frac{\ln \frac{I(z)}{I_0}}{\mu} = -\frac{\ln(10^{-4})}{0,7416 \text{ cm}^{-1}} = 12,42 \text{ cm}$

17. Warum gibt es in den meisten der heute betriebenen Kernspaltungsreaktoren ein Nachwärmeproblem? Wodurch entsteht die Nachwärme? Worin besteht das Problem? Welche technischen Gegenmaßnahmen gibt es? Welche quantitativen Aussagen können Sie zum Nachwärmeproblem bei einem Leistungsreaktor mit  $P_{\text{el}} = 1200 \text{ MW}$  machen?



Nachwärme entsteht unvermeidbar durch die radioaktiven Spaltprodukte. Die Halbwertszeiten der Spaltprodukte bestimmen die Abklingkurve der Wärmeproduktion und sind durch physikalische-technische Maßnahmen nicht beeinflussbar. Die Nachwärme muss bei einem Leichtwasserreaktor aktiv aus dem Reaktorgefäß entfernt werden (aktive Kühlungseinrichtungen) Bei einem 1200 MW<sub>el</sub> Reaktor, der etwa 4000 MW thermische Leistung hat, beträgt die Nachwärmeproduktion einige Minuten nach dem Ausschalten knapp 100 MW, nach 100 Tagen ist sie auf 2-3 MW abgeklungen. Nach dieser Zeit reicht normalerweise auch eine passive Kühlung.

18. Mit welchen Reaktionsgleichungen können Sie die  $\alpha$ -,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ - und EC-Radioaktivität beschreiben? Unter welchen Bedingungen tritt eine EC-Umwandlung, unter welchen Bedingungen ein  $\beta^+$ -Zerfall auf?



19. Beschreiben Sie die spektralen Energieverteilungen (Spektren) der  $\alpha$ -,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ - und EC-Radioaktivität.

$\alpha$ -Zerfall: Diskrete Spektren  
 $\beta^-$ -Zerfall: Kontinuierliche Spektren  
 $\beta^+$ -Zerfall: Kontinuierliche Spektren  
 EC-Zerfall: Neutrino hat diskretes Spektrum

20. Im Vorlesungsversuch wurde die Schwächung von  $\gamma$ -Strahlung der Energie  $E_\gamma = 662 \text{ keV}$  ( $^{137}\text{Cs}$ ) in Blei untersucht.

Absorberdicke	$E_\gamma = 661,6 \text{ keV}$
$x / \text{cm}$	$N / 12 \text{ s}$
0,8	2745
4,8	116

Die Untergrundzählrate betrug 7 Ereignisse in einer Messzeit von 10 s. Ohne Absorber wurden fünf Messungen durchgeführt, die 7047, 6725, 7023, 6950 und 6818 Ereignisse in 10 s lieferten.

Bestimmen Sie den Schwächungskoeffizienten  $\mu$ , den Massenschwächungskoeffizienten  $\frac{\mu}{\rho}$  und den Wirkungsquerschnitt  $\sigma$ .

(Dichte Blei  $\rho_{\text{Pb}} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$ , rel. Atommasse:  $A_{\text{rel,Fe}} = 207,2 \text{ g mol}^{-1}$ , Avogadro Zahl:  $N_A = 6,02214129 \cdot 10^{23} \text{ g mol}^{-1}$ )

$$\bar{N}_0 = \frac{1}{5}(7047 + 6725 + 7023 + 6950 + 6818) = 6912,6 \text{ in } 12 \text{ s}$$



Bestimmung von  $\mu$ : 
$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{N(z_2) - N_u}{N_0 - N_u}\right) - \ln\left(\frac{N(z_1) - N_u}{N_0 - N_u}\right)}{z_2 - z_1}$$

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{116 - 7}{6912,6 - 7}\right) - \ln\left(\frac{2745 - 5,5}{6912,6 - 7}\right)}{3,6 - 0,8} = -1,1512 \text{ cm}^{-1}$$

Massenschwächungskoeffizient: 
$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1,2897 \text{ cm}^{-1}}{11,3 \text{ g cm}^{-3}} = 0,1019 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Wirkungsquerschnitt: 
$$\sigma = \frac{A_{rel}}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{207,2 \text{ g mol}^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \cdot 0,1019 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

$$\sigma = \frac{A_{rel}}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = 3,50 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 = 35,0 \text{ barn}$$

21. Vergleichen Sie das experimentelle Ergebnis des Massenschwächungskoeffizienten  $\frac{\mu}{\rho}$  mit Werten aus der Literatur (siehe Anlage).

Berechnung von  $(\mu/\rho)$  aus Tabelle (siehe Anlage A2):

E / keV	$\mu/\rho$ / (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	ln(E)	ln( $\mu/\rho$ )
600	1,248E-01	6,39693	-2,08104
800	8,870E-02	6,68461	-2,42250
<b>661,6</b>	<b>1,111E-01</b>	6,49466	-2,19704

Massenschwächungskoeffizient für  $E_\gamma = 0,662 \text{ MeV}$  in Pb:

$$\frac{\mu}{\rho} = 0,1111 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Abweichung: 
$$\frac{\Delta(\mu/\rho)}{(\mu/\rho)} = \frac{0,0092}{0,1111} = 8,3\%$$

Schwächungskoeffizient für  $E_\gamma = 0,662 \text{ MeV}$  in Pb:

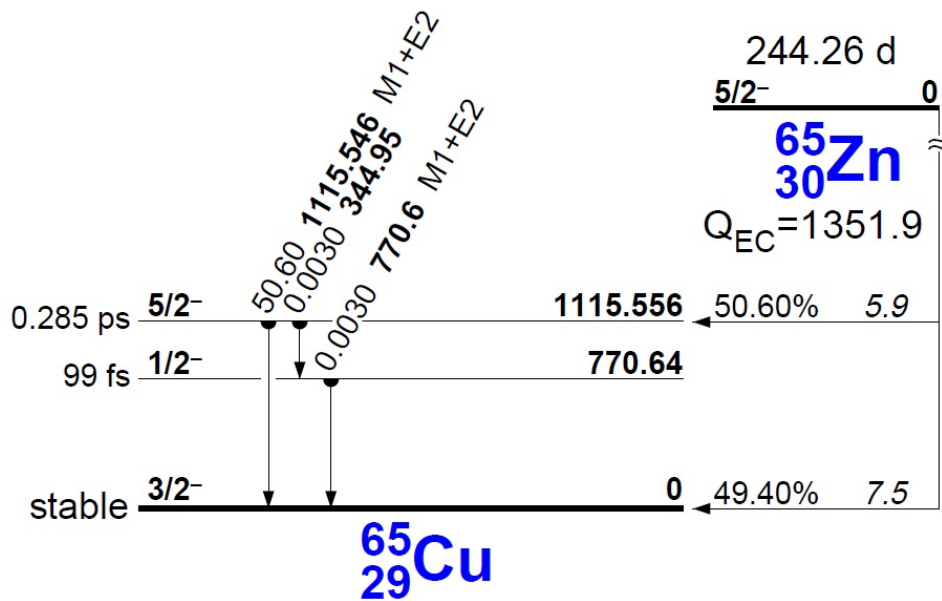
$$\mu = \frac{\mu}{\rho} \cdot \rho = 0,1111 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \cdot 11,3 \text{ g cm}^{-3} = 1,25543 \text{ cm}^{-1}$$

Wirkungsquerschnitt: 
$$\sigma = \frac{A_{rel}}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{207,2 \text{ g mol}^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} \cdot 0,1111 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

$$\sigma = \frac{A_{rel}}{N_A} \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = 3,82 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^2 = 38,2 \text{ barn}$$

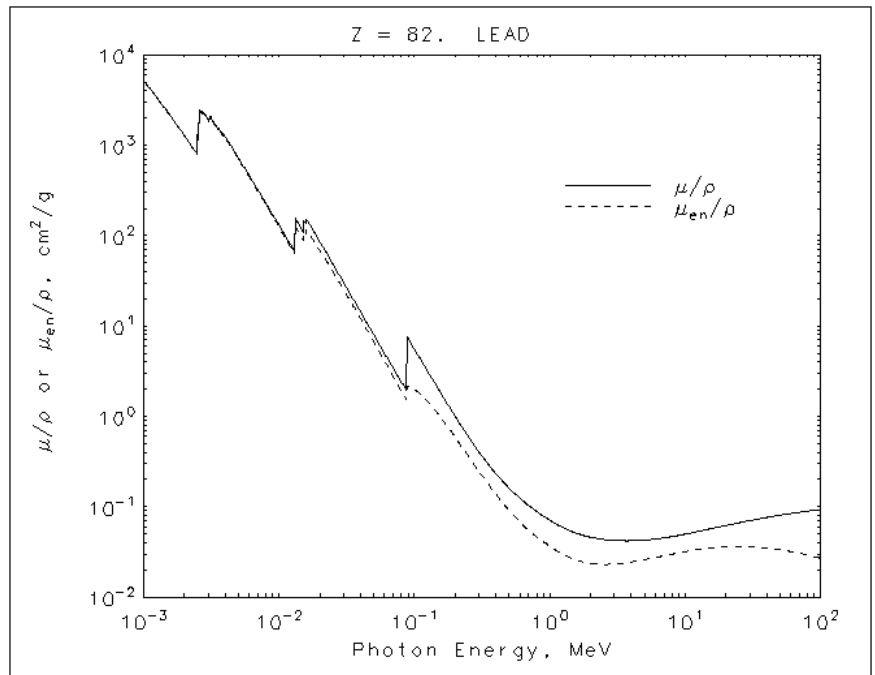


### Anlage A1: Zerfallsschemata des $^{65}\text{Zn}$



### Anlage A2 Mass attenuation coefficient / Massenschwächungskoeffizient

$E / \text{MeV}$	$(\mu / \rho)$ $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ Blei
3,0E-02	3,032E+01
4,0E-02	1,436E+01
5,0E-02	8,041E+00
6,0E-02	5,021E+00
8,0E-02	2,419E+00
8,8E-02	1,910E+00
8,8E-02	7,683E+00
1,0E-01	5,549E+00
1,5E-01	2,014E+00
2,0E-01	9,985E-01
3,0E-01	4,031E-01
4,0E-01	2,323E-01
5,0E-01	1,614E-01
6,0E-01	1,248E-01
8,0E-01	8,870E-02
1,0E+00	7,102E-02
1,3E+00	5,876E-02
1,5E+00	5,222E-02
2,0E+00	4,606E-02
3,0E+00	4,234E-02
4,0E+00	4,197E-02
5,0E+00	4,272E-02
6,0E+00	4,391E-02
8,0E+00	4,675E-02
1,0E+01	4,972E-02



Dichte:  $\rho_{Pb} = 11,3 \text{ g cm}^{-3}$

Quelle:

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>







N =	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	N =		
n	0	8071,3171												n	0	
H	1	7288,9705	13135,72158	14949,806	25901,518	32892,44	41863,757	49135#	<b>Mass excess = <math>m_{exc}c^2 = (m(Z,A) - A * u) * c^2</math> in keV</b>						H	1
He	2		14931,21475	2424,91565	11386,233	17595,106	26101,038	31598,044	40939,429	48809,203				He	2	
Li	3	28667#	25323,185	11678,886	14086,793	14908,141	20946,844	24954,264	33050,581	40797,31	50096#			Li	3	
Be	4		37996#	18374,947	15770,034	4941,672	11347,648	12606,67	20174,064	25076,506	33247,823	39954,498	49798#	57678#	Be	4
B	5		43603#	27868,346	22921,49	12415,681	12050,731	8667,931	13368,899	16562,166	23663,683	28972,278	37081,686	43770,816	B	5
C	6			35094,06	28910,491	15698,682	10650,342	0	3125,01129	3019,89305	9873,144	13694,129	21038,832	24926,178	C	6
N	7				38800,148	24303,569	17338,082	5345,481	2863,41704	101,43805	5683,658	7871,368	13114,466	15862,129	N	7
O	8					32047,954	23112,428	8007,356	2855,605	-4737,00141	-808,813	-781,522	3334,87	3797,462	O	8
F	9		<b>Mass excess values in keV</b>				32658#	16775,372	10680,254	1951,701	873,701	-1487,386	-17,404	-47,551	F	9
Ne	10						23996,462	16460,901	5317,166	1751,44	-7041,93131	-5731,776	-8024,715	Ne	10	
N =	0	1	2	3	4	5		24189,968	12926,808	6847,719	-2184,161	-5182,436	-9529,85358	Na	11	
								33040,092	17570,348	10910,506	-396,963	-5473,766	-13933,567	Mg	12	
N =	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N =		
			<b><math>u = 1,660\,538\,86\,10^{-27}</math> kg <math>uc^2 = 931,494\,043</math> MeV</b>													
B	5	52322#	59364#						26119#	18183#	6769,57	-56,946	-8916,172	Al	13	
C	6	32420,666	37557,61	45960#	53281#				32164#	23772#	10754,673	3824,318	-7144,632	Si	14	
N	7	21765,11	25251,164	32038,675	38396#	47543#	56504#							P	15	
O	8	8062,906	9284,152	14612,96	19070,4	27442#	35713#	44954#	53850#					S	16	
F	9	2793,378	3329,747	7559,527	11272,706	18271,772	24926,86	33226#	40296#	48903#	56289#			Cl	17	
Ne	10	-5154,045	-5951,521	-2108,075	429,611	7069,949	11244,601	18057,881	23102,025	30842#	37278#	45997#	53121#	Ar	18	
Na	11	-8418,114	-9357,818	-6862,316	-5517,436	-989,247	2665,004	8361,09	12654,768	19064,478	24889,293	32761#	39582#	47953#	Na	11
Mg	12	-13192,826	-16214,582	-14586,651	-15018,641	-10619,032	-8910,672	-3217,38	-954,781	4894,07	8808,603	16152#	21424#	29249#	Mg	12
Al	13	-12210,309	-17196,658	-16850,441	-18215,322	-15872,419	-14953,628	-11061,966	-8529,377	-2932,495	-130,19	5781,974	9946,326	16050,594	Al	13
Si	14	-12384,301	-21492,79678	-21895,046	-24432,928	-22949,006	-24080,907	-20492,662	-19956,77	-14360,307	-12482,507	-6579,998	-4067,274	1928,205	Si	14
P	15	-7158,753	-16952,626	-20200,575	-24440,885	-24305,218	-26337,486	-24557,669	-24857,74	-20250,977	-18994,145	-14757,82	-12873,735	-8106,838	P	15
S	16	-3159,582	-14062,532	-19044,648	-26015,697	-26585,994	-29931,788	-28846,356	-30664,075	-26896,36	-26861,197	-23162,245	-22866,568	-19019,105	S	16
Cl	17	4443#	-7067,165	-13329,771	-21003,432	-24439,776	-29013,54	-29521,857	-31761,532	-29798,097	-29800,203	-27557,81	-27307,189	-24912,99	Cl	17
Ar	18	11293#	-2200,204	-9384,141	-18377,217	-23047,411	-30231,54	-30947,659	-34714,551	-33242,011	-35039,89602	-33067,467	-34422,675	-32009,808	Ar	18
K	19	20418#	6763#	-1481#	-11168,9	-17426,171	-24800,199	-28800,691	-33807,011	-33535,205	-35559,074	-35021,556	-36593,239	-35809,606	K	19
Ca	20		13153#	4602#	-6439,359	-13161,76	-22059,22	-27274,4	-34846,275	-35137,759	-38547,072	-38408,639	-41468,479	-40811,95	Ca	20
Sc	21			13898#	2841#	-4937#	-14168,021	-20523,228	-28642,392	-32121,239	-36187,929	-37816,093	-41067,792	-41757,115	Sc	21
Ti	22				9101#	1500#	-8850,275	-15700#	-25121,552	-29321,103	-37548,459	-39005,737	-44123,422	-44932,394	Ti	22
V	23					10330#	-205#	-8169#	-18024#	-24116,38	-31879,629	-37073,013	-42002,051	-44475,385	V	23
N =	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	N =		

Anlage 4: Mass Excess Table: G. Audi, A.H. Wapstra and C. Thibault, [http://ie.lbl.gov/mass/2003AWMass\\_3.pdf](http://ie.lbl.gov/mass/2003AWMass_3.pdf)



